

В результате ряда проведенных экспериментов по истечению воды и водо-воздушной смеси как из одиночных форсунок, так и из группы форсунок, установленных в коллекторе, определены параметры воды и воздуха, при которых достигается наиболее равномерное распределение водо-воздушной смеси по площади орошения. В дальнейшем намечено исследовать процессы нагрева подшипниковых колец с приваренными к ним термодатчиками до температуры 820...860°C в печи и процессы их заковки водо-воздушной смесью.

#### Список использованных источников

1. Сталь марки ШХ15 [Электронный ресурс] / Центральный металлический портал РФ, 2014. Реж. доступа: <http://metallischekiy-portal.ru>.
2. Будрин Д.В., Кондратов В. М. Металловедение и термическая обработка металлов. 1965. №6. – С. 22-25.

УДК 621.746.584

**Ю. Г. Ярошенко<sup>1</sup>, Ю. И. Липунов<sup>2</sup>, К. Ю. Эйсмонт<sup>2</sup>, В. С. Кузнецова<sup>1</sup>,  
М. В. Захарченко<sup>2</sup>, Е. В. Киселев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия,

<sup>2</sup> ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники» (ОАО «ВНИИМТ»), г. Екатеринбург, Россия

### РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УСКОРЕННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ТРУБ ДЛЯ ТПЦ-1 ЧТПЗ

#### Аннотация

*Проведено расчетное моделирование процесса ускоренного охлаждения в устройстве спрейерного охлаждения для условий цеха ТПЦ-1 Челябинского трубопрокатного завода. Определены начальные и граничные условия решения уравнения Фурье для бесконечного цилиндра для условий охлаждения водяными струями. Установлен расход воды на устройство и определена его длина для труб различного типоразмера, обрабатываемых в технологической цепочке пильгерстана.*

*Ключевые слова: ускоренное охлаждение, трубы, низколегированная сталь, расход воды, пильгерстан.*

#### Abstract

*A computational modeling of the accelerated cooling process in the cooling spray device was made for conditions of the TPC-1 shop of Chelyabinsk Pipe Rolling Plant. Initial and boundary conditions of the solution of the Fourier equation for an infinite cylinder cooled with water flows were determined. The water consumption on each device and length were determined for pipes of different sizes processed in the processing chain of pilgerstan.*

*Keywords: cooling proces, pipes, steel, low-alloy steel, water consumptio, pilgerstan.*

Трубопрокатный цех №1 ЧТПЗ производит бесшовные трубы на пильгерстане из трубных низколегированных сталей, в частности, стали 30Г2, характеристики которой приведены в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав стали 30Г2

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0.26 - 0.35	0.17 - 0.37	1.4 - 1.8	до 0.3	до 0.035	до 0.035	до 0.3	до 0.3

После пильгерстана трубы подвергаются резке на мерные длины и при температуре 450–500°C помещаются в нормализационную печь. После выхода из печи трубы охлаждаются на воздухе и нормализуются.

Разработка устройств регулируемого охлаждения водяными струями с точки зрения ресурсо- и энергосбережения является перспективным направлением, т.к. возможно обеспечить механические свойства готовых изделий при экологически чистом ведении процесса. В частности, в работе [1] сделан ряд практических выводов о том, что такие устройства просты в исполнении и легко управляемы, а главным их преимуществом является возможность управлять процессом термоупрочнения.

Устройство ускоренного охлаждения струями воды планируется поставить за нормализационной печью перед калибровочным устройством с целью повысить механические свойства стали и достигнуть  $\sigma_b \approx 670$  МПа.

Устройство водяного регулируемого охлаждения труб будет состоять из трех секций охладителей длиной 0,8 м. Каждая секция представляет собой 6 коллекторов с 12 форсунками. Один контур секции представлен на рис. 1 и представляет собой кольцо из плоских водяных факелов, направленных на трубу под наклоном.

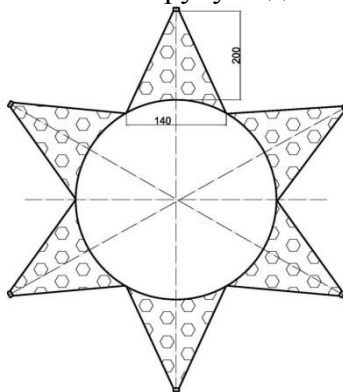


Рис. 1. Один контур охлаждения трубы

Важным моментом при конструировании устройства является определение требуемой длины зоны струйного водяного охлаждения и расхода воды на нее.

Для расчета теплового состояния трубы при ее охлаждении после выхода из печи используется программное обеспечение, в основе которого лежит математическая модель теплообмена бесконечного цилиндра с окружающей средой при различных граничных условиях. Уравнение теплопроводности Фурье для бесконечного цилиндра принимает следующий вид (1):

$$c(t)\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda(t) \left[ \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right] \quad (1)$$

Для расчета задаются начальные условия и граничные условия второго и третьего рода на внешней и внутренней поверхностях трубы при охлаждении воздухом и водой

1) начальное условие

$$t(\tau_0) = t_{нач},$$

где  $t_{нач}$  – температура по сечению стенки трубы, величина постоянная.

2) для случая конвективного и лучистого теплообмена на воздухе:

– на внешней поверхности трубы

$$\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=r_1} = \alpha_{\kappa l} (t_{новл} - t_{окр.сп.}) + \varepsilon_m c_0 \left[ \left( \frac{T_{новл}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{окр.сп.1}}{100} \right)^4 \right], \quad (2)$$

– на внутренней поверхности трубы

$$\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=r_2} = \alpha_{k2} (t_{ноб2} - t_{окр.ср.}) + \varepsilon_m c_0 \left[ \left( \frac{T_{ноб2}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{окр.ср.2}}{100} \right)^4 \right],$$

где  $\lambda(t)$  – коэффициент теплопроводности стали,  $\alpha_{k1}$  – коэффициент теплоотдачи конвективный на внешней поверхности трубы,  $\alpha_{k2}$  – коэффициент теплоотдачи конвективный на внутренней поверхности трубы,  $\varepsilon_m$  – степень черноты поверхности,  $c_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела;  $t_{ноб1}$ ,  $T_{ноб1}$  – температура внешней поверхности;  $t_{ноб2}$ ,  $T_{ноб2}$  – температура внутренней поверхности;  $t_{окр.ср1}$ ,  $T_{окр.ср1}$  – температура окружающей среды,  $t_{окр.ср2}$ ,  $T_{окр.ср2}$  – температура окружающей среды внутри трубы,  $t_{окр.ср}$ ,  $r_1$  – внешний радиус трубы,  $r_2$  – внутренний радиус трубы.

3) для случая охлаждения водой:

– на внешней поверхности трубы

$$\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=r_1} = \frac{\alpha_1(t)(t_{ноб1} - t_{вод.})}{q_1 \text{ при } t_{ноб1} \geq 100^\circ\text{C}}, \quad (3)$$

– на внутренней поверхности трубы

$$\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=r_2} = \frac{\alpha_2(t)(t_{ноб2} - t_{вод.})}{q_2 \text{ при } t_{ноб2} \geq 100^\circ\text{C}}.$$

где  $q_1$ ,  $q_2$  – плотность теплового потока на внешней и внутренней поверхностях трубы соответственно,  $t_{вод.}$  – температура воды.

В работе [2] показано, что для инженерных расчетов с достаточной степенью точности можно считать, что пока температура поверхности изделия, охлаждаемого водой, не опустится ниже  $100^\circ\text{C}$ , снимаемый с поверхности тепловой поток постоянен и зависит только от плотности орошения поверхности водой.

Для расчета расхода воды использовались экспериментальные зависимости плотности теплового потока от плотности орошения, полученные на устройствах струйного водяного охлаждения, в частности, при охлаждении листового проката на стане 5000 ОАО «Северсталь» [3].

$$q_B = 0,0799 + 0,05398 W_B, \quad (4)$$

$$q_H = 0,0799 + 0,02571 W_H, \quad (5)$$

где  $q_B$ ,  $q_H$  – плотность теплового потока на верхней и нижней поверхностях листа, соответственно,  $\text{МВт/м}^2$ ;  $W_B$ ,  $W_H$  – плотность орошения водой,  $\text{м}^3/\text{м}^2 \text{ час}$ .

Зависимость (4) получена для верхней поверхности листа, (5) – для нижней поверхности.

Зависимость (4) использовалась для расчета расхода воды для 1/6 верхней части поверхности трубы. На нижнюю поверхность трубы плотность орошения водой принималась в 2 раза выше, чем на верхнюю, на боковые поверхности – в 1,5 раза выше.

В результате расчетного моделирования для трубы с толщиной стенки 8 мм получена приведенная на рис. 2 зависимость времени охлаждения от температуры  $890^\circ\text{C}$  до температуры  $650^\circ\text{C}$  от плотности теплового потока на внешней поверхности трубы, внутренняя поверхность трубы не охлаждалась. Часть результатов расчетов приведена в табл. 2.

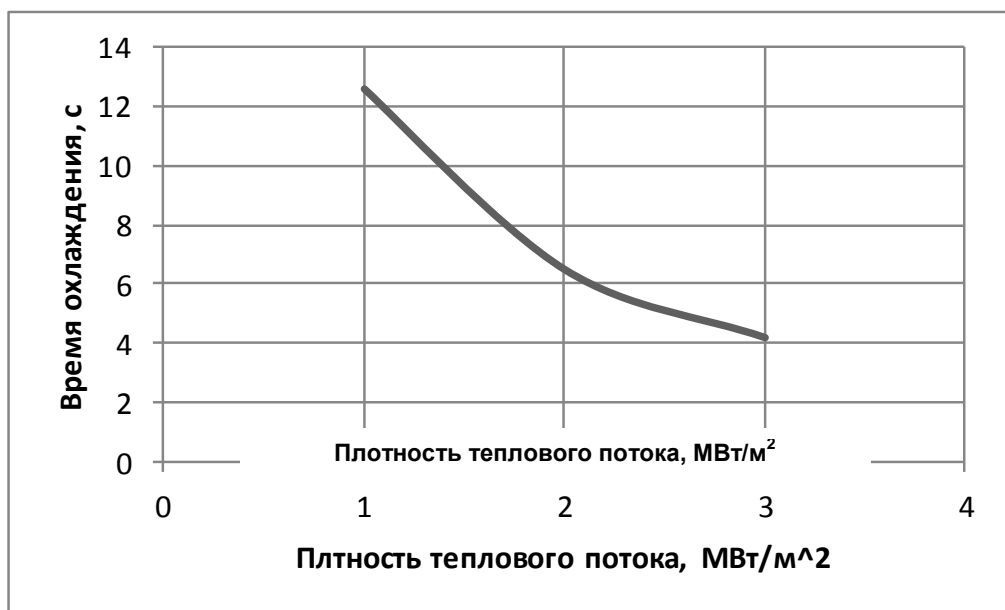


Рис. 2. Зависимость времени охлаждения от 890°С до 650°С от плотности теплового потока (толщина стенки трубы 8 мм)

Таблица 2

Результаты расчетного моделирования для толщины стенки трубы 8 мм

Диаметр трубы, мм	Толщина стенки трубы, мм	Температура,		Тепловой поток, МВт/м²	Время охлаждения до температур ы конца	Скорость транспорти ровки трубы, м/мин	Требуемая длина зоны охлаждения , м	Расход воды на зону охлаждения, м³/ч
		начала охлаж дения	конца охлаж дения					
273	8	890	650	1	12,5	3,5	0,73	4,38
					12,6	4	0,84	5,04
					12,7	4,5	0,95	5,72
					12,75	5	1,06	6,38
				2	6,275	3,5	0,37	2,20
					6,5	4	0,43	2,60
					6,35	4,5	0,48	2,86
					6,375	5	0,53	3,19
				3	4,18	3,5	0,24	1,46
					4,2	4	0,28	1,68
					4,23	4,5	0,32	1,90
					4,25	5	0,35	2,13
325	8	890	650	1	12,6	3,5	0,74	4,41
					12,7	4	0,85	5,08
					12,75	4,5	0,96	5,74
					12,8	5	1,07	6,40
				2	6,3	3,5	0,37	2,21
					6,33	4	0,42	2,53
					6,38	4,5	0,48	2,87
					6,40	5	0,53	3,20
				3	3,70	3,5	0,22	1,30
					4,20	4	0,28	1,68
					4,25	4,5	0,32	1,91
					4,23	5	0,35	2,12

В результате расчетного моделирования определена длина зоны охлаждения и расход воды на нее для труб различного сортамента.

### Список использованных источников

1. Эйсмонтт Ю.Г. Исследование закалочных сред, альтернативных закалочным маслам / Ю.Г. Эйсмонтт // Металловедение и термическая обработка металлов. 2000. №11. С. 32–36.
2. Липунов Ю. И. Исследование и разработка устройств для струйного охлаждения листового проката притермической обработке в потоке: дис. ...канд. техн.наук: 05.16.02 / Липунов Юрий Иванович. – Свердловск, 1977. – 213 с.
3. Эйсмонтт К.Ю. Разработка и внедрение в производство устройств термоупрочнения проката регулируемым охлаждением на основе анализа процессов теплообмена: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01; 05.16.02 / Эйсмонтт К. Ю. / Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники, Ур. фед. ун-т им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2011.